"نشریه علوم زراعی ایران"
جلد بیست و ششم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0

اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی ریشه و عملکرد دانه ارقام ولاین‌های امیدبخش گندم نان (*Triticum aestivum* L.)

Effect of drought stress on morphological and biochemical root characteristics and grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars and promising lines

رعنا عزتی، محمود تورچی، محمد مقدم واحد و مظفر روستایی

چکیده

عزتی، ر.، م. تورچی، م. مقدم واحد و م. روستایی. ۱۴۰۳. اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی ریشه و عملکرد دانه ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم نان (*Triticum aestivum* L.). **نشریه علوم زراعی ایران. ۲۶ (۲): ۱۴۷ -۱۲۹.**

تنش‌های محیطی مانند تنش خشکی بر رشد و عملکرد گندم نان اثر منفی دارند. برای ارزیابی اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی ریشه ژنوتیپ‌های گندم نان در مقایسه با شرایط بدون تنش، آزمایشی در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تکرار اجرا شد. کرت های اصلی شامل دو سطح آبیاری بدون تنش (آبیاری پس از ۳۰ میلی‌متر) و تنش خشکی (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر) تبخیر از تشتک تبخیر و ۲۵ ژنوتیپ گندم نان در کرت های فرعی مورد ارزیابی قرار گرفتند. صفات و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده شامل وزن تر و خشک ریشه، طول ریشه، مساحت ریشه، چگالی (وزن حجمی) ریشه، قطر ریشه، حجم ریشه، عملکرد دانه و محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید ارقام گندم بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین ژنوتیپ‌های گندم و برهمکنش آبیاری و ژنوتیپ برای کلیه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده تفاوت معنی‌داری وجود داشت. نتایج تجزیه واریانس برای صفات بیوشیمیایی در ۱٦ ژنوتیپ منتخب گندم نشان داد که از نظر محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید، بین ژنوتیپ‌ها و تیمارهای آبیاری و برهمکنش آنها تفاوت معنی‌داری وجود داشت. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای، ۲۵ ژنوتیپ گندم در تیمارهای بدون تنش و تنش خشکی در سه گروه و همچنین ۱٦ ژنوتیپ منتخب گندم برای محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید در تیمارهای بدون تنش و تنش خشکی در دو گروه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در شرایط تنش خشکی، همبستگی عملکرد دانه با مساحت ریشه (*۰/٤٦٧ = r)، قطر ریشه (۰/۵۵۹ = r)، وزن تر ریشه (*۰/٤۷۸ = r)، طول ریشه (*۰/٤۹۵ = r)، حجم ریشه (*۰/۳۹۷ = r)، محتوای مالون دی‌آلدئید (**۰/٦٤۹ = r) و پرولین (*۰/۵۰۷ = r) مثبت و معنی‌دار بود. ارقام گندم سرداری، آذر۲، تکاب، ایوان، رصد، هما، لاین DARI-12، رقم اوحدی، لاین DARI-11، ارقام پراو، صدرا، لاین‌های DARI-13، DARI-16 و DARI-19 با دارا بودن میانگین‌های بالاتر در طول ریشه (۷۵/۵ سانتی‌متر)، مساحت ریشه (۱۲۹/۵ سانتی‌متر مربع)، حجم ریشه (۱۲/٦۰ سانتی‌متر مکعب)، قطر ریشه (۰/۱٤ میلی‌متر)، چگالی ریشه (۰/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، وزن تر ریشه (۸/٤۸ گرم)، وزن خشک ریشه (۲/٦۳ گرم) و عملکرد دانه (۳/۰۵ گرم در بوته) و ارقام کمال، تکاب، لاین DARI-19 و سائین با دارا بودن میانگین‌های بالاتر در محتوای پرولین (۰/۳۱ مول در گرم وزن تر) و ارقام آذر۲، ایوان، لاین‌های DARI-16، DARI-14، ارقام صدرا، هشترود، ریژاو، پراو، واران، لاین DARI-12، ارقام هما و سرداری با دارا بودن میانگین‌های کمتر در محتوای مالون دی‌آلدئید (۰/۱۸ مول در گرم وزن تر) در شرایط تنش خشکی، به عنوان ارقام برتر شناخته شدند.**

واژه‌های کلیدی: پرولین، تجزیه خوشه‌ای، تجزیه تابع تشخیص، حجم ریشه و گندم نان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲٦
این مقاله مستخرج از رساله دکتری نگارنده اول می‌باشد

۱- دانشجوی دکتری دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (مکاتبه کننده، mtoorchi@tabrizu.ac.ir ✉)
۳- استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۴- استاد گروه تحقیقات غلات، موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، مراغه، ایران

Effect of drought stress on morphological and biochemical root characteristics and grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars and promising lines

Ezzati, R.[1], Toorchi, M.[2], Moghaddam Vahed, M.[3] and Roostaei, M.[4]

ABSTRACT

Ezzati, R., Toorchi, M., Moghaddam Vahed, M. and Roostaei, M. 2025. Effect of drought stress on morphological and biochemical root characteristics and grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars and promising lines. **Iranian Journal of Crop Sciences. 26(2): 129-147. (In Persian).**

Introduction: Plants are constantly exposed to biotic and abiotic stresses. Among these stresses, water-deficit stress is considered one of the most important adverse factors for the growth and performance of plants and a serious threat to the sustainable production of crops under changing climate conditions (Lambers *et al*., 2008). Human food security heavily depends on cereals, especially wheat. However, the production of these crops is affected by water-deficit stress.
Materials and Methods: The current experiment was conducted at Tabriz University, Iran in 2021-22 growing season. Plant materials included 25 winter wheat cultivars and promising lines, which were evaluated under two irrigation conditions (30 mm evaporation from the class A pan (non stress) and 100 mm evaporation from the class A pan (drought stress). The experiment was conducted as a split-plot design in a randomized complete block design five replications. Two levels of irrigation were assigned to main plots and 25 winter wheat genotypes were randomized in sub-plots. Root traits such as root fresh and dry weight, root length, root area, root volume, root diameter, root density, grain yield per plant and biochemical attributes such as proline and malondialdehyde contents, for 16 selected genotypes were measured in two replications.
Results: Analysis of variance showed that there was significant differences among the wheat wheat cultivars and promising lines for all studied traits. There were significant difference between two irrigation conditions for all traits, except root density. On the other hand, the interaction effect of stress and genotype was significant for all traits. Analysis of variance for biochemical attributes for 16 selected wheat genotypes, in two replications, showed that there was significant difference among the studied genotypes for proline and malondialdehyde contents. There was significant difference between two irrigation levels. The interaction of stress and genotype was significant for proline and malondialdehyde contents. Correlation analysis between grain yield and root area (r = 0.467*), root diameter (r = 0.559**), root fresh weight (r = 0.478*), root length (r = 0.495*), root volume (r = 0.397*), malondialdehyde content (r = 0.649**) and proline content (r = 0.507*) were positive and significant under drought stress conditions. The cluster analysis of 25 wheat genotypes based on all studied traits, grouped them in two clusters for two irrigation conditions. Also, cluster analysis for proline and malondialdehyde contents, in two irrigation conditions, grouped 16 selected genotypes in two clusters. According to the results of this experiment, under stress conditions, cv. Sardari, cv. Azar2, cv. Takab, cv. Ivan, cv. Rasad, cv. Homa, DARI-12 promising line, cv. Owhadi, DARI-11 promising line, cv. Parav, cv. Sadra, and DARI-13, DARI-16 and DARI-19 promising lines can be considered for better root traits such as root length, root area, root volume, root diameter, root density, root fresh and dry weight, a higher mean and high performance. Also, cv. Saeen, cv. Kamal, cv. Takab, DARI-19 promising line for having higher proline content. Cv. Azar2, cv. Ivan, DARI-16 and DARI-14 promising lines, cv. Sadra, cv. Hashtrood, cv. Rijav, cv. Parav, cv. Varan, DARI-12 promising line, cv. Homa, cv. Sardari had the lowest malondialdehyde content.
Conclusion: The results of this experiment showed that wheat genotypes under drought stress conditions, responded by decreasing or increasing of root traits to improve grain yield. These responses prevented the reduction of grain yield under drought stress conditions. Tolerant cultivars and promising lines had optimal grain yield under drought stress conditions. Grain yield had positive and significant correlation with root area, root diameter, root fresh weight, root length, root volume, proline cntent, and malondialdehyde content. Cultivars and promising lines with higher root length, root volume, root weight, root diameter, root area, proline and malondialdehyde contents showed higher tolerant to drought stress conditions. The results of cluster analysis of morphological root traits of 25 winter wheat cultivars and promising lines under two irrigation conditions, showed that cv. Sardari, cv. Azar2, cv. Takab, cv. Ivan, cv. Rasad, cv. Homa, DARI-12 promising line, cv. Owhadi, DARI-11 promising line, cv. Parav, cv. Sadra, and DARI-13, DARI-16 and DARI-19 lines had better morphological root traits with mean root area of 129.5 cm^2, root density of 0.32 $g.cm^{-3}$, root diameter of 0.14 mm, root dry weight of 2.36 g, root fresh weight of 8.48 g, root length of 75.5 cm, root volume of 12.6 cm^3 and mean of grain yield of 3.05 $g.plant^{-1}$. Also, cv. Saeen, cv. Kamal, cv. Takab, and DARI-19 line, had the highest mean of proline content (0.31 µmol g^{-1} FW) and cv. Azar2, cv. Ivan, DARI-16 and DARI-14, cv. Sadra, cv. Hashtrood, cv. Rijav, cv. Parav, cv. Varan, DARI-12 line, cv. Homa, cv. Sardari had the lowest mean of malondialdehyde content (0.18 $µmol.g^{-1}$ FW). In general, based on the results of this experiment, cv. Sardari, cv. Azar2, cv. Takab, cv. Ivan, cv. Rasad, cv. Homa, DARI-12 line, cv. Owhadi, DARI-11 line, cv. Parav, cv. Sadra, and DARI-13, DARI-16 and DARI-19 promising lines that had better morphological and biochemical traits and grain yield were identified as superior drought tolerant cultivars and promising lines.

Key words: Bread wheat, Cluster analysis, Discriminant analysis, Proline content, Malondialdehyde content and Root volume

Received: January, 2024 **Accepted: August, 2024**

1. PhD Student, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. Professor, University of Tabriz, Tabriz, Iran (Corresponding author, ✉ mtoorchi@tabrizu.ac.ir)
3. Professor, University of Tabriz, Tabriz, Iran
4. Professor, Cereal Research Department, Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Maragheh, Iran

مقدمه

گیاهان به‌طور مداوم در معرض تنش‌های زیستی و غیرزیستی قرار دارند. تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل نامطلوب برای رشد و عملکرد گیاهان و تهدیدی جدی برای تولید پایدار محصولات زراعی در شرایط تغییر آب و هوا محسوب می‌شود (Lambers *et al*., 2008). خشکی بر ویژگی‌های زراعی و فیزیولوژیک گیاهان تأثیر می‌گذارد و باعث کاهش رشد ریشه، تجمع زیست توده و عملکرد گیاهان زراعی می‌شود. درهمین‌ارتباط گزینش گیاهان زراعی دارای صفات مطلوب ریشه برای دستیابی به عملکرد بالا در خاک‌های دارای محدودیت آبی، همواره مورد توجه بوده است (Rahnama *et al*., 2011). این موضوع مستلزم درک بهتر ارتباط این بخش از گیاه با محیط است. ساختار ریشه گیاهان به‌وسیله عواملی مانند ژنتیک، تراکم بوته، اندازه گیاه، الگوهای زراعی و شرایط آب و هوایی فصلی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. ساختار ریشه و سازگاری آن به شرایط کم‌آبی توسط ویژگی‌هایی مانند طول ریشه، تعداد ریشه، قطر ریشه و چگالی ریشه تعیین می‌شود (Colombi and Walter, 2017). ریشه عمیق‌تر یک ویژگی مهم برای تحمل به تنش کم‌آبی در گندم محسوب می‌شود (Li *et al*., 2019). از این رو، آگاهی از وضعیت ریشه و توزیع آن در خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Wasson *et al*., 2012). از طول ریشه برای تعیین پاسخ ریشه به تغییرات محیطی استفاده می‌شود (Bohm, 2012). در یک آزمایش روی دو ژنوتیپ متحمل و حساس گندم به تنش کم‌آبی گزارش شد که در ژنوتیپ متحمل، زیست توده ریشه و طول ریشه در شرایط تنش افزایش یافتند (Faghani *et al*., 2015). ژو و همکاران (Xue *et al*., 2003) با ارزیابی ارقام گندم در شرایط تنش خشکی در مرحله گیاهچه‌ای گزارش دادند که طول ریشه با شدت گرفتن تنش خشکی افزایش می‌یابد و ارقام متحمل‌تر دارای ویژگی‌های مطلوب‌تر سیستم ریشه‌ای در شرایط تنش هستند. وزن ریشه نیز یک شاخص مناسب برای توصیف توده کل ریشه در خاک است (Bohm, 2012). نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای نشان داده است که افزایش طول و تراکم ریشه می‌تواند اثر تنش خشکی را با افزایش جذب آب تعدیل کنند (Manschadi *et al*., 2008). در غلات به ویژه گندم، مراحل طویل شدن ساقه و پرشدن دانه به تنش کم‌آبی حساسیت بیشتری دارند .تنش کم آبی در مرحله پر شدن دانه اغلب باعث کاهش وزن و عملکرد دانه می‌شود (Prasad *et al*., 2011).

صفات بیوشیمیایی شاخص‌های گزینشی مناسبی در شناسایی ژنوتیپ‌های مطلوب هستند. در شرایط تنش خشکی فرایندهای بیوشیمیایی باعث بسته شدن روزنه‌ها، مهار فتوسنتز، کاهش شاخص کلروفیل و کاهش تعرق می‌شوند و فعالیت‌های آنتی اکسیدانی و تنظیم اسمزی نیز در این زمینه موثر هستند (Nezhadahmadi *et al*.,2013). پراکسیداسیون لیپیدی غشاء یک شاخص فیزیولوژیکی است که در پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی اتفاق می‌افتد و از آن به عنوان یک نشانگر زیستی برای ارزیابی آسیب یا مرگ سلولی ناشی از تنش استفاده می‌شود (Awasthi *et al.* 2018). نتایج تحقیقات نشان داده است که تنش کم‌آبی باعث آسیب به غشای سلول و تجمع مالون دی‌آلدئید (MDA) و مرگ سلول شود. به همین علت مالون دی‌آلدئید به عنوان یک شاخص برای تعیین شدت تنش اکسیداسیونی در نظر گرفته می‌شود (Gill and Tuteja, 2010). در اکثر گونه‌های گیاهی، پرولین به‌طور طبیعی به‌عنوان اسمولیت آلی در هنگام مواجه شدن گیاه با تنش‌های غیرزنده تجمع پیدا می‌کند (Rhodes and Hanson, 1993). گزارش شده است که در ارقام گندم در شرایط تنش خشکی، محتوای پرولین افزایش می‌یابد (Johari-Pireivatlou, 2010).

هدف از اجرای این تحقیق ارزیابی اثر تنش خشکی

بر ویژگی‌های ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی ریشه و عملکرد دانه ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم نان در مقایسه با شرایط بدون تنش و شناسایی ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم دیم متحمل به تنش خشکی بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز واقع در اراضی کرکج در ۱۲ کیلومتری شرق تبریز با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی، عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۶۰ متری از سطح دریا اجرا شد. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تکرار اجرا شد. مواد گیاهی شامل ۲۵ رقم گندم پاییزه بود که بذر آنها از موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور دریافت شده بود (جدول ۱). تیمارهای آزمایشی شامل آبیاری کامل (بدون تنش) (آبیاری پس از ۳۰ میلی‌متر تبخیر) و تنش خشکی (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر) از تشتک تبخیر کلاس A بودند که در کرت‌های اصلی و ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در کرت‌های فرعی قرار داده شدند. بذرها در داخل لوله‌های پلی‌اتیلنی ته‌باز به طول ۱۲۰ سانتی‌متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر که درون آن‌ها پلاستیک قرار داده شده و با خاک زراعی پر شده بودند کاشته شدند. لوله‌ها در گودال‌هایی به عمق ۱/۵ متر و طول شش متر و عرض شش متر قرار داده شدند. در هر لوله شش عدد بذر کاشته شد و بعد از سبز شدن بوته‌ها، به چهار بوته کاهش داده شدند. در ابتدا، آبیاری کلیه واحدهای آزمایشی تا مرحله ظهور دومین گره ساقه به صورت یکسان انجام شده و بعد از این مرحله، اعمال تنش خشکی آغاز شد. اعمال تنش تا مرحله انتهایی ظهور سنبله (کد زادوکس ۵/۵۷ (Zadoks *et al.*, 1974) و تا رسیدگی کامل دانه‌ها ادامه داده شد. برای جلوگیری از ورود آب باران به واحدهای آزمایشی

جدول ۱- مشخصات ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم نان مورد آزمایش

Table 1. Characteristics of bread wheat cultivars and promising lines used in the experiment

Wheat cultivars	ارقام گندم	Characteristics	مشخصات
Sardari	سرداری	Early maturity, Drought tolerant	زودرس، متحمل به خشکی
Takab	تکاب	High yielding, Cold and drought tolerant	عملکرد بالا، متحمل به سرما و خشکی
Saeen	سائین	High yielding, Cold and drought tolerant	عملکرد بالا، متحمل به سرما و خشکی
Azar2	آذر۲	Cold and drought tolerant, Early maturity	متحمل به سرما و خشکی، زودرس
Rahmat	رحمت	High yielding, Early maturity, Drought tolerant	عملکرد بالا، زودرس، متحمل به خشکی
Mehr	مهر	High yielding, Cold and drought tolerant	عملکرد بالا، متحمل یه خشکی و سرما
Shalan	شالان	High yielding, Drought stress tolerant	عملکرد بالا، متحمل به خشکی
Varan	واران	High yielding, Early maturity	عملکرد بالا، زودرس
Baran	باران	Grain yield stability, Early maturity, Cold and drought tolerant	پایداری عملکرد، زودرس، متحمل به سرما و خشکی
Hoor	هور	High yielding under high rainfall, Resistant to lodging	عملکرد بالا در مناطق دیم پرباران، مقاوم به ورس
Parav	پراو	High yielding under high rainfall, Cold tolerant	عملکرد بالا در مناطق دیم پرباران، متحمل به سرما
Kamal	کمال	Grain yield stability, Cold and drought tolerant	پایداری عملکرد، متحمل به سرما و خشکی
Hashtrood	هشترود	Grain yield stability, Early maturity, Cold and drought tolerant	پایداری عملکرد، زودرس، متحمل به سرما و خشکی
Owhadi	اوحدی	Early maturity, Cold and drought tolerant	زودرس، متحمل به سرما و خشکی
Sadra	صدرا	High yielding, Resistant to lodging, Drought tolerant	عملکرد بالا، مقاوم به ورس، متحمل به خشکی و سرما
Rasad	رصد	Grain yield stability, Cold and drought tolerant	پایداری عملکرد، متحمل به خشکی و سرما
Rijav	ریژاو	Drought tolerant	متحمل به خشکی
Ivan	ایوان	Early maturity, Cold and drought tolerant	زودرس، متحمل به سرما و خشکی
Homa	هما	Early maturity, Cold and drought tolerant	زودرس، متحمل به سرما و خشکی
Dari-11	داری۱۱	Drought tolerant	متحمل به خشکی
Dari-12	داری۱۲	Drought tolerant	متحمل به خشکی
Dari-13	داری۱۳	Drought tolerant	متحمل به خشکی
Dari-14	داری۱۴	Drought tolerant	متحمل به خشکی
Dari-16	داری۱۶	Drought tolerant	متحمل به خشکی
Dari-19	داری۱۹	Drought tolerant	متحمل به خشکی

تحت تنش خشکی، پوشش پلاستیکی در بالای محل قرار گرفتن لوله‌ها نصب شد. پس از رسیدگی کامل دانه‌ها، اندام‌های هوایی از سطح خاک قطع شدند. با توجه به تعبیه پلاستیک در داخل لوله‌ها، خارج کردن ریشه‌ها با حداقل آسیب انجام شد. پلاستیک‌های حاوی ریشه‌ها، در داخل یک حوضچه آب قرار داده شده و پس از نرم شدن خاک اطراف ریشه‌ها از داخل حوضچه بیرون آورده شدند. ریشه‌ها با استفاده از فشار کم آب شستشو داده شدند. ریشه‌های شسته شده و عاری از خاک، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مورد نظر به آزمایشگاه انتقال داده شدند (Rahnama *et al.*, 2024).

وزن تر ریشه با استفاده از ترازوی حساس با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد شده و پس از آن، طول بلندترین قسمت ریشه (عمق نفوذ ریشه)، با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. حجم ریشه با قرار دادن ریشه‌ها در داخل استوانه مدرج حاوی آب و اختلاف سطح آب قبل و بعد از قرار دادن ریشه، اندازه گرفته شد. پس از خشکاندن ریشه‌ها در آون در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت، وزن خشک آنها با استفاده از ترازوی حساس اندازه‌گیری شد. مساحت ریشه، چگالی (وزن حجمی) ریشه و قطر ریشه با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ و ۳ محاسبه شدند (Alizadeh, 2012). کلیه اندازه‌گیری‌های مربوط به ریشه به‌دلیل در هم تنیده شدن ریشه‌ها و احتمال آسیب در هنگام جدا کردن ریشه‌ها، در چهار بوته انجام و از آنها میانگین گرفته شد. عملکرد دانه در چهار بوته اندازه‌گیری و از آنها میانگین گرفته شد.

(رابطه ۱)

$^{۰/۵}$(حجم ریشه × π × طول ریشه) × ۲ = مساحت ریشه (سانتی‌مترمربع)

(رابطه ۲)

$$\text{چگالی ریشه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)} = \frac{\text{وزن خشک ریشه}}{\text{حجم ریشه}}$$

(رابطه ۳) (π × طول ریشه)/ وزن تر ریشه = قطر ریشه (میلی‌متر)

از ۲۵ رقم گندم مورد ارزیابی، ۱۶ رقم با استفاده از تجزیه خوشه‌ای در دو تکرار انتخاب شدند. از ارقام منتخب هشت رقم و لاین (تکاب، آذر۲، داری۱۹، و سرداری، صدرا، پراو، Dari-16 و ایوان) که از نظر کلیه صفات دارای میانگین بهتری بودند (تکاب، آذر۲، Dari-19، سرداری، صدرا، پراو، Dari-16 و ایوان) و هشت رقم که دارای میانگین کمتر بودند (Dari-12، کمال، واران، Dari-14، هشترود، سائین، هما و ریژاو) انتخاب شده و محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید (بر اساس میانگین دو بوته) در آنها اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری محتوای پرولین ریشه با استفاده از روش بیتس (Bates *et al.*, 1973) و رابطه ۴ انجام شد.

(رابطه ۴)

$$\text{Proline } (\mu mol^{-1} gFW) = \frac{M \times T \times W}{115.5} \times 1000$$

M: عدد قرائت شده در دستگاه اسپکتروفتومتر، T: حجم تولوئن مورد استفاده و W: وزن نمونه ریشه هستند.

اندازه‌گیری محتوای مالون دی‌آلدئید (MDA) ریشه با استفاده از روش هیث و پیکر (Heath and Packer, 1968) و رابطه ۵ انجام شد.

(رابطه ۵)

$$\text{MDA } (\mu mol\ g^{-1} FW) = \frac{(A532 - A600) \times FW}{116} \times 1000$$

A532 و A600: به‌ترتیب میزان جذب در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر در اسپکتروفتومتر هستند.

تجزیه داده‌های مربوط به ویژگی‌های ریشه و عملکرد دانه براساس میانگین چهار بوته انجام شد. یکنواختی واریانس‌های خطاهای آزمایشی و ارزیابی روابط بین صفات با استفاده از روش تجزیه همبستگی پیرسون و نرم افزار SPSS 21 انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای گروه‌بندی ارقام از نظر صفات ریشه از تجزیه خوشه‌ای به روش Ward و برای تعیین محل برش دندروگرام از تجزیه تابع تشخیص استفاده شد. تجزیه خوشه‌ای و تجزیه تابع تشخیص با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. برای رسم شکل‌ها

از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که بین ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم برای کلیه ویژگی‌های ریشه، به‌غیر از قطر ریشه، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود داشت که این موضوع نشان دهنده تنوع ژنتیکی بین این ارقام و لاین‌های امیدبخش از نظر ویژگی‌های ریشه است. برای کلیه ویژگی‌های ریشه، به‌غیر از چگالی ریشه، بین دو تیمار آبیاری تفاوت معنی‌داری وجود داشت که نشان دهنده تاثیر تنش خشکی بر ویژگی‌های ریشه است. برهمکنش آبیاری و ژنوتیپ برای کلیه ویژگی‌های ریشه معنی‌دار بود که نشان دهنده تغییر تفاوت بین ارقام گندم در تیمارهای آبیاری است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که بین ژنوتیپ‌های گندم برای محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد وجود داشت. اثر تیمارهای آبیاری نیز بر این دو ترکیب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برهمکنش آبیاری و ژنوتیپ برای هر دو ترکیب معنی‌دار بود که نشان دهنده تغییر محتوای آنها در ژنوتیپ‌های گندم در تیمارهای آبیاری است.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش وزن تر ریشه ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم به جز لاین Dari-16 و Dari-19 شد (جدول ۲). در تیمار تنش خشکی لاین Dari-12 با میانگین ۱۰/۲۴ گرم بیشترین و رقم هور با میانگین ۵/۹ گرم کمترین وزن تر ریشه را در تیمار آبیاری کامل (بدون تنش) داشتند. در تیمار تنش خشکی بیشترین مقدار وزن تر ریشه مربوط به رقم Dari-16 (۱۰/۱۳ گرم) و کمترین مقدار آن (پنج گرم) مربوط به رقم مهر بود (جدول ۲). در اکثر ژنوتیپ‌های گندم، وزن تر ریشه در شرایط تنش خشکی کاهش داشت. لاین Dari-12 با ۳/۸۹ گرم و رقم هور با ۱/۱۱ گرم در شرایط آبیاری کامل، به‌ترتیب بیشترین و کمترین وزن خشک ریشه را داشتند. در شرایط تنش خشکی رقم سرداری با میانگین ۳/۴۱ گرم بیشترین وزن خشک ریشه را داشت (جدول ۲). در اکثر ژنوتیپ‌های گندم، وزن خشک ریشه در تیمار تنش خشکی کمتر بود. نتایج سایر تحقیقات نیز نشان داده است که تنش کم‌آبی باعث کاهش وزن تر ریشه می‌شود (Hasan *et al*., 2021; Faisal *et al*., 2017).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که لاین Dari-12 با میانگین ۹۱/۲ سانتی‌متر بیشترین مقدار طول (عمق نفوذ) ریشه را در تیمار بدون تنش دارا بود و لاین Dari-16 نیز با میانگین ۹۰/۲ سانتی‌متر بیشترین مقدار را در شرایط تنش خشکی داشت. کلیه ژنوتیپ‌های گندم، به‌جز لاین Dari-16، Dari-19 و رقم هور، دارای طول ریشه کمتری در شرایط تنش خشکی بودند (جدول ۲). کم‌آبیاری باعث کاهش طول ریشه می‌شود، اما افزایش شدت تنش به علت تغییر در سیستم ریشه، باعث افزایش طول ریشه می‌شود. گزارش شده است که تنش متوسط در مقایسه با حالت بدون تنش باعث کاهش طول ریشه شده، ولی افزایش شدت تنش، باعث افزایش طول ریشه می‌شود (Gheysari *et al*., 2015).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش حجم ریشه کلیه ژنوتیپ‌های گندم به‌جز رقم هور شد. بیشترین مقدار حجم ریشه در شرایط آبیاری کامل مربوط به ارقام رصد، لاین Dari-12، ارقام آذر۲ وایوان (به‌ترتیب ۱۷، ۱۶/۸، ۱۶/۴، ۱۶/۴ سانتی‌متر مکعب) و کمترین مقدار حجم ریشه در شرایط آبیاری کامل مربوط به رقم هور (۹/۸ سانتی‌متر مکعب) بود. در تیمار تنش خشکی بیشترین مقدار حجم ریشه مربوط به ارقام آذر۲ و رصد (به‌ترتیب ۱۵ و۱۴/۶ سانتی‌متر مکعب) و کمترین مقدار حجم ریشه مربوط به ارقام کمال و مهر (به‌ترتیب ۸ و ۷/۴ سانتی‌متر مکعب) بود (جدول ۲). گزارش شده است که تنش خشکی باعث کاهش حجم ریشه گندم می‌شود و اثر تنش، رقم

و برهمکنش آنها بر حجم ریشه معنی‌دار است. در شرایط تنش خشکی شدید ۹۰ درصد حجم ریشه‌ها در لایه‌های سطحی خاک متمرکز می‌شوند، زیرا در این شرایط عمده حجم آب قابل دسترس خاک در لایه‌های سطحی قرار دارد (Adda *et al.*, 2005).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها لاین Dari-12، ارقام تکاب، آذر۲، رصد، مهر به‌ترتیب با میانگین ۱۵۱/۹، ۱۵۰/۸، ۱۴۶/۳، ۱۴۴ و ۱۴۳/۹ سانتی‌متر مربع، بیشترین و رقم هور با میانگین ۸۷/۵ سانتی‌متر مربع کمترین مقدار مساحت ریشه را در شرایط آبیاری کامل داشتند. در شرایط تنش خشکی بیشترین مساحت ریشه به‌ترتیب با میانگین ۱۴۳/۳ و ۱۴۱/۳ سانتی‌متر مربع مربوط به رقن تکاب و لاین Dari-16 بود (جدول ۲). کاهش مساحت ریشه در شرایط تنش خشکی توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Hosseinalipour *et al.*, 2020).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، در تیمار آبیاری کامل بیشترین قطر ریشه مربوط به لاین Dari-16 (۰/۲۷ میلی‌متر) و کمترین مقدار آن مربوط به رقم آذر۲ (۰/۱۶ میلی‌متر) بود. در تیمار تنش خشکی بیشترین و کمترین مقدار قطر ریشه به‌ترتیب مربوط به رقم رصد (۰/۱۸ میلی‌متر) و لاین Dari-19 (۰/۱۰ میلی‌متر) بود (جدول ۲). عبدالشاهی و همکاران (Abdulshahi *et al.*, 2019) در ارزیابی تحمل به تنش خشکی سه رقم گندم گزارش دادند که ارقام مورد بررسی در شرایط بدون تنش از لحاظ قطر ریشه تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند، ولی در شرایط تنش خشکی، ژنوتیپ‌های متحمل ریشه‌های قطورتری داشتند. به‌نظر می‌رسد که افزایش قطر ریشه یکی از راهکارهای تحمل به تنش خشکی است.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در تیمار آبیاری کامل بیشترین چگالی (وزن حجمی) ریشه به رقم رصد (۰/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و کمترین مقدار آن به رقم هور (۰/۳۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب) تعلق داشت. در تیمار تنش خشکی بیشترین و کمترین مقدار چگالی ریشه به‌ترتیب مربوط به لاین Dari-19 (۰/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و رقم سائین (۰/۲۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بود (جدول ۲). کاهش حجم ریشه در شرایط تنش خشکی از دلایل اصلی افزایش چگالی ریشه است. افزایش وزن خشک ریشه بیش از افزایش آن بوده و باعث افزایش چگالی ریشه شده است، اما پس از شروع رشد زایشی به دلیل انتقال بیشتر مواد پرورده به اندام‌های زایشی و اختصاص کمتر آنها به ریشه‌ها و در نتیجه شیب کمتر افزایش وزن خشک ریشه نسبت به حجم آن، احتمالاً علت اصلی کاهش چگالی ریشه در مرحله زایشی می‌باشد (Ganjeali *et al.*, 2010).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، رقم باران، لاین‌های Dari-12 و Dari-19، به‌ترتیب با میانگین ۴/۳۶، ۴/۳۵ و ۴/۰۵ گرم در بوته بیشترین و رقم شالان با میانگین ۳/۲۵ گرم در بوته کمترین مقدار عملکرد دانه را در تیمار آبیاری کامل دارا بودند. در شرایط تنش خشکی بیشترین مقدار عملکرد دانه به‌ترتیب با میانگین ۳/۵۸، ۳/۵۶ و ۳/۱۲ گرم در بوته مربوط به ارقام هما، تکاب و لاین Dari-12 بود (جدول ۲). مهدوی و همکاران (Mahdavi *et al.*, 2022) و امام و همکاران (Emam *et al.*, 2022) کاهش عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم در شرایط تنش خشکی را گزارش کرده‌اند. نتایج تجزیه همبستگی نشان داد که عملکرد دانه با مساحت ریشه ($r = ۰/۴۷۳^{*}$)، وزن تر ریشه ($r = ۰/۴۱۹^{*}$)، طول ریشه ($r = ۰/۴۲۱^{*}$) و حجم ریشه ($r = ۰/۴۳۷^{*}$) و در تیمار تنش خشکی با مساحت ریشه ($r = ۰/۴۶۷^{*}$)، قطر ریشه ($r = ۰/۵۵۹^{**}$)، وزن تر ریشه ($r = ۰/۴۷۸^{*}$)، طول ریشه ($r = ۰/۴۹۵^{*}$) و حجم ریشه ($r = ۰/۳۹۷^{*}$)، همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت (جدول ۴). این یافته‌ها با گزارش نظری و همکاران (Nazari *et al.*, 2017) همخوانی دارد. در تیمار تنش خشکی همبستگی عملکرد دانه با محتوای مالون دی‌آلدئید ($r = ۰/۶۴۹^{**}$) و پرولین ($r = ۰/۵۰۷^{*}$) مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۵).

جدول ۲- مقایسه میانگین صفات گیاهی ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمارهای آبیاری کامل (بدون تنش) و تنش خشکی

Table 2. Mean comparison of plant traits of wheat cultivars and promising lines in full irrigation (normal) and drought stress treatments

Wheat cultivars	ارقام گندم	Irrigation treatments	تیمارهای آبیاری	وزن تر ریشه Root fresh weight (g)	وزن خشک ریشه Root dray weight (g)	طول ریشه Root length (cm)	مساحت ریشه Root area (cm^2)	حجم ریشه Root volume (cm^3)	قطر ریشه Root diameter (mm)	چگالی ریشه Root density ($g.cm^3$)	عملکرد دانه Grain yield ($g.plant^{-1}$)
Sardari	سرداری	Full irrigation	آبیاری کامل	9.26a-f	2.95a-g	82.2a-g	137.3ab	14.6abc	0.182b-i	0.456a-f	3.91a-d
		Drought stress	تنش خشکی	8.37a-h	3.41a-b	74.4d-h	114.0ab	14.0abc	0.136f-j	0.264h-n	3.08a-j
Azar2	آذر۲	Full irrigation	آبیاری کامل	9.53a-d	2.78a-g	84.6a-d	146.3 a	16.4a	0.160c-j	0.456a-f	3.66a-g
		Drought stress	تنش خشکی	8.81a-h	3.11a-f	78.6d-h	119.7ab	15.0abc	0.136 f-j	0.298e-n	2.42a-j
Owhadi	اوحدی	Full irrigation	آبیاری کامل	8.79a-h	2.02b-g	78.2a-h	115.4ab	14.4abc	0.212a-g	0.444a-g	3.92a-d
		Drought stress	تنش خشکی	7.92a-h	1.97 c-g	70.4d-h	132.5ab	12.2abc	0.158c-j	0.286f-n	2.87a-j
Homa	هما	Full irrigation	آبیاری کامل	8.22a-h	2.63a-g	73.2a-h	122.9ab	13.4abc	0.212b-i	0.414a-k	3.63a-g
		Drought stress	تنش خشکی	7.14a-h	2.71a-g	63.6d-h	113.6ab	10.2abc	0.170b-j	0.254j-n	3.58a-g
Takab	تکاب	Full irrigation	آبیاری کامل	9.35a-e	2.56a-g	83.2a-e	150.8a	15.6ab	0.184a-g	0.466a-e	3.57a-h
		Drought stress	تنش خشکی	8.95a-g	2.81a-g	80.0a-g	143.3a	14.0abc	0.156c-j	0.352a-n	3.56a-h
Rasad	رصد	Full irrigation	آبیاری کامل	10.00abc	3.17a-d	890abc	144.0a	17.0a	0.212a-i	0.482ab	3.88a-d
		Drought stress	تنش خشکی	8.33a-h	2.96a-g	74.0a-h	123.4ab	14.6abc	0.186a-i	0.302d-n	3.12a-j
Baran	باران	Full irrigation	آبیاری کامل	8.83a-h	2.34a-g	78.6a-h	131.5ab	15.6ab	0.204a-i	0.420a-j	4.35a
		Drought stress	تنش خشکی	6.18c-h	2.13a-g	55.0c-h	111.8ab	9.0abc	0.15c-j	0.220mn	2.86a-j
Saeen	سائین	Full irrigation	آبیاری کامل	8.04a-h	1.15h	71.6a-h	114.1ab	12.8abc	0.192a-i	0.410a-k	3.50a-h
		Drought stress	تنش خشکی	6.90a-h	2.83a-g	61.0a-h	109.0ab	11.0abc	0.146c-j	0.204n	1.67f-j
Hashtrood	هشترود	Full irrigation	آبیاری کامل	9.25a-g	3.17a-d	82.4a-f	131.6ab	14.6abc	0.186a-g	0.476abc	3.76a-e
		Drought stress	تنش خشکی	6.64a-h	2.94a-g	59.0a-h	105.4ab	10.2abc	0.16c-j	0.268h-n	2.48a-j
Rijav	ریژاو	Full irrigation	آبیاری کامل	9.86abc	2.89a-g	87.6abc	138.5ab	15.6ab	0.210a-f	0.472a-d	3.57a-h
		Drought stress	تنش خشکی	5.42fgh	2.64a-g	48.2fgh	102.2ab	9.6abc	0.146c-j	0.232lmn	1.18 j
Parav	پراو	Full irrigation	آبیاری کامل	9.12a-g	2.70a-g	81.0a-g	134.3ab	15.6ab	0.218a-d	0.428a-i	3.88a-d
		Drought stress	تنش خشکی	8.13a-h	2.38a-g	72.4a-h	128.1ab	10.4abc	0.124hij	0.318b-n	1.81e-j
Ivan	ایوان	Full irrigation	آبیاری کامل	8.68a-h	3.11a-e	77.2a-h	137.7ab	16.4a	0.224a-g	0.424a-j	3.29a-i
		Drought stress	تنش خشکی	7.96a-h	2.98a-g	70.8a-h	136.6ab	12.2abc	0.162c-j	0.288f-n	1.98d-j
Sadra	صدرا	Full irrigation	آبیاری کامل	8.51a-h	3.33ab	75.8a-h	135.5ab	13.4abc	0.214a-h	0.432a-h	3.73a-e
		Drought stress	تنش خشکی	8.56a-h	2.77a-g	76.2a-h	135.5ab	13.2abc	0.120ij	0.310c-n	2.03c-j
Varan	واران	Full irrigation	آبیاری کامل	9.29a-f	2.94a-g	83.0a-e	130.2ab	15.2abc	0.208a-h	0.444a-g	3.68a-f
		Drought stress	تنش خشکی	5.59e-h	2.06b-g	49.8e-h	107.0ab	10.0abc	0.132g-j	0.224lmn	2.26b-j
Kamal	کمال	Full irrigation	آبیاری کامل	9.14a-g	2.67a-g	81.4a-g	135.5ab	14.4abc	0.210a-g	0.444a-g	3.59a-g
		Drought stress	تنش خشکی	5.35gh	2.30a-g	47.6gh	106.2ab	8.0bc	0.124hij	0.208n	2.42a-j
Shallan	شالان	Full irrigation	آبیاری کامل	8.06a-h	3.08a-f	71.8a-h	130.7ab	12.4abc	0.218a-f	0.406a-k	3.25a-i
		Drought stress	تنش خشکی	6.38a-h	2.21a-g	56.8a-h	103.8ab	10.2abc	0.140d-j	0.248k-n	2.37a-j
Rahmat	رحمت	Full irrigation	آبیاری کامل	8.45a-h	3.28abc	75.2a-h	125.1ab	13.4abc	0.222a-e	0.408a-k	4.17ab
		Drought stress	تنش خشکی	6.69a-h	1.80efg	59.6a-h	111.8ab	10.8abc	0.136f-j	0.272h-n	2.88a-j
Mehr	مهر	Full irrigation	آبیاری کامل	8.45a-h	3.04a-f	75.2a-h	143.9a	15.2abc	0.248ab	0.462a-e	4.35a
		Drought stress	تنش خشکی	5.00h	2.71a-g	44.6h	98.0ab	7.4c	0.138e-j	0.208n	2.09c-j
Dari-12	داری۱۲	Full irrigation	آبیاری کامل	10.24a	3.89a	91.2a	151.9a	16.8a	0.224a-d	0.492a	3.91a-d
		Drought stress	تنش خشکی	7.50a-h	2.65a-g	67.0a-h	109.7ab	10.8abc	0.142d-j	0.256j-n	3.14a-j
Dari-13	داری۱۳	Full irrigation	آبیاری کامل	9.32a-e	2.90a-g	83.0a-e	128.2ab	15.6ab	0.210a-g	0.448a-g	3.88a-d
		Drought stress	تنش خشکی	7.40a-h	2.85a-g	66.0a-h	117.9ab	11.6abc	0.124hij	0.260i-n	2.68a-j
Hoor	هور	Full irrigation	آبیاری کامل	5.90d-h	1.11h	52.4d-h	87.5b	9.8abc	0.230abc	0.386a-m	2.43a-j
		Drought stress	تنش خشکی	6.52b-h	1.86d-g	55.6b-h	105.7ab	10.8abc	0.120ij	0.220mn	1.62g-j
Dari-11	داری۱۱	Full irrigation	آبیاری کامل	8.13a-h	3.04a-f	72.2d-h	132.9ab	12.6abc	0.212a-g	0.420a-j	3.45a-h
		Drought stress	تنش خشکی	7.67a-h	1.78fg	68.2a-h	125.0ab	11.8abc	0.140d-j	0.284g-n	1.52h-j
Dari-14	داری۱۴	Full irrigation	آبیاری کامل	8.25a-h	2.67a-g	73.4d-h	129.1ab	13.0abc	0.222a-e	0.424a-j	3.50a-h
		Drought stress	تنش خشکی	6.91a-h	2.12a-g	61.2a-h	120.1ab	10.4abc	0.120ij	0.278g-n	1.34ij
Dari-16	داری۱۶	Full irrigation	آبیاری کامل	8.89a-h	2.78a-g	79.2d-h	138.4ab	14.0abc	0.270a	0.420a-j	3.76a-e
		Drought stress	تنش خشکی	10.13ab	2.23a-g	90.2ab	141.3ab	10.6abc	0.136f-j	0.340a-n	2.38a-j
Dari-19	داری۱۹	Full irrigation	آبیاری کامل	6.39a-h	2.81a-g	57.0d-h	119.4ab	10.4abc	0.222a-e	0.392a-l	4.05a-c
		Drought stress	تنش خشکی	7.66a-h	1.66g	68.0a-h	121.4ab	9.8abc	0.096j	0.414a-k	2.45a-j

در هر ستون‌های میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Tukey's test

جدول ۳- مقایسه میانگین محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید ریشه ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمارهای آبیاری کامل (بدون تنش) و تنش خشکی

Table 3. Mean comparison of Proline and Malondialdehyde content of root of wheat cultivars and promising lines in full irrigation (normal) and drought stress treatments

Wheat cultivars	ارقام گندم	Irrigation treatments	تیمارهای آبیاری	پرولین Proline (µmol.g^{-1} FW)	مالون دی‌آلدئید Malondialdehyde (µmol.g^{-1} FW)
Homa	هما	Full irrigation	آبیاری کامل	0.22i	0.137e
		Drought stress	تنش خشکی	0.265d-h	0.174a-e
Rijav	ریژاو	Full irrigation	آبیاری کامل	0.245hi	0.145de
		Drought stress	تنش خشکی	0.295b-e	0.185a-d
Saeen	سائین	Full irrigation	آبیاری کامل	0.283b-g	0.178a-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.336a	0.205a
Hashtrood	هشترود	Full irrigation	آبیاری کامل	0.294b-f	0.169a-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.285b-g	0.185a-d
Dari-14	داری۱۴	Full irrigation	آبیاری کامل	0.262e-h	0.168a-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.282b-g	0.178a-e
Varan	واران	Full irrigation	آبیاری کامل	0.281b-g	0.167a-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.281b-g	0.182a-d
Kamal	کمال	Full irrigation	آبیاری کامل	0.258gh	0.166a-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.307ab	0.191abc
Dari-19	دا ری۱۹	Full irrigation	آبیاری کامل	0.302abc	0.178a-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.298bcd	0.197ab
Dari-12	دار ی۱۲	Full irrigation	آبیاری کامل	0.265d-h	0.149cde
		Drought stress	تنش خشکی	0.282b-g	0.188abc
Parav	پراو	Full irrigation	آبیاری کامل	0.280b-g	0.167a-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.284b-g	0.179a-e
Ivan	ایوان	Full irrigation	آبیاری کامل	0.267d-h	0.161b-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.284b-g	0.184a-d
Azar2	آذر۲	Full irrigation	آبیاری کامل	0.274b-h	0.159b-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.284b-g	0.179a-e
Sardari	سرداری	Full irrigation	آبیاری کامل	0.276b-h	0.170a-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.283b-g	0.178a-e
Dari-16	داری۱۶	Full irrigation	آبیاری کامل	0.260fgh	0.162b-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.222i	0.153cde
Sadra	صدرا	Full irrigation	آبیاری کامل	0.268c-h	0.171a-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.284b-g	0.179a-e
Takab	تکاب	Full irrigation	آبیاری کامل	0.266d-h	0.170a-e
		Drought stress	تنش خشکی	0.296b-e	0.196ab

در هر ستون‌های میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Tukey's test

جدول ۴- ضرایب همبستگی بین صفات گیاهی ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمارهای آبیاری کامل (بدون تنش) (بالای قطر) و تنش خشکی (پایین قطر)

Table 4. Correlation coefficients between plant traits of wheat cultivars and promising lines in full irrigation (normal) (above diameter) and drought stress (below diameter) treatments

Plant traits	صفات گیاهی	مساحت ریشه Root area	چگالی ریشه Root density	قطر ریشه Root diameter	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume	عملکرد دانه Grain yield
Root area	مساحت ریشه	1	0.714**	-0.139	0.224	0.787**	0.787**	0.769**	0.473*
Root density	چگالی ریشه	0.742**	1	-0.304	0.140	0.851**	0.851**	0.792**	0.343
Root diameter	قطر ریشه	0.088	-0.174	1	0.229	-0.292	-0.289	-0.241	0.015
Root dry weight	وزن خشک ریشه	0.042	-0.098	0.433*	1	0.032	0.032	0.037	-0.071
Root fresh weight	وزن تر ریشه	0.849**	0.741**	0.095	0.246	1	1.000**	0.916**	0.419*
Root length	طول ریشه	0.852**	0.745**	0.104	0.258	0.999**	1	0.915**	0.421*
Root volume	حجم ریشه	0.572**	0.432*	0.291	0.466*	0.743**	0.740**	1	0.437*
Grain yield	عملکرد دانه	0.467*	0.366	0.559**	0.272	0.478*	0.495*	0.397*	1

*, **: significant at 5% and 1% probability levels, respectively

*، **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

جدول ۵- ضرایب همبستگی بین عملکرد دانه و محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید ریشه ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمارهای آبیاری کامل (بدون تنش) (بالای قطر) و تنش خشکی (پایین قطر)

Table 5. Correlation coefficients grain yield, Proline and Malondialdehyde content of root of wheat cultivars and promising lines in full irrigation (normal) (above diameter) and drought stress (below diameter) treatments

Plant traits	صفات گیاهی	پرولین Proline	مالون دی‌آلدئید Malondialdehyde	عملکرد دانه Grain yield
Proline	پرولین	1	0.819**	0.405
Malondialdehyde	مالون دی‌آلدئید	0.819**	1	0.164
Grain yield	عملکرد دانه	0.507**	0.649*	1

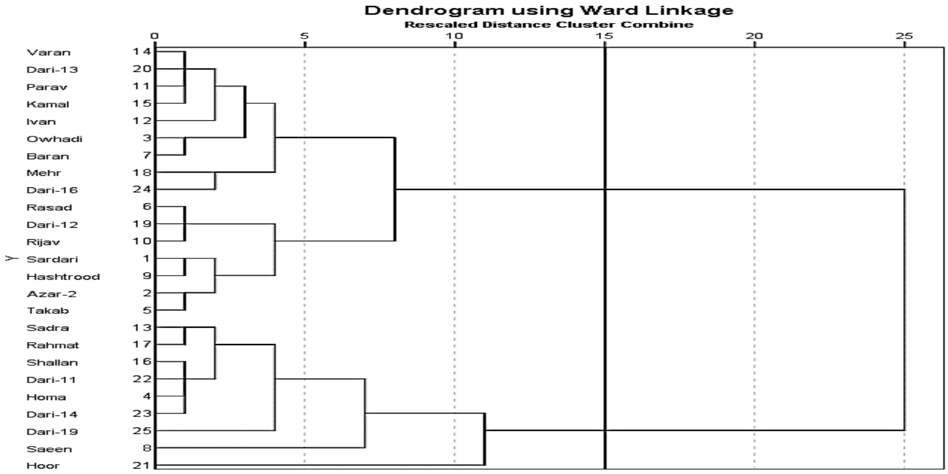
*، **: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

*, **: significant at 5% and 1% probability levels, respectively

نتایج نشان داد که در تیمار آبیاری کامل، ارقام هما و ریژاو دارای کمترین مقدار پرولین ریشه بودند. در تیمار تنش خشکی ارقام سائین، کمال، تکاب و لاین Dari-19 محتوای پرولین بیشتری نسبت به سایر ارقام داشتند. به‌طور کلی اکثر ارقام گندم در تیمار تنش خشکی پرولین بیشتری داشتند (جدول ۳). به گزارش وندروسکولو و همکاران (Vendruscolo *et al.*, 2007) تجمع پرولین در گیاه یک راهکار برای جلوگیری از اثر زیانبار تنش کمبود آب بوده و مقدار آن بعد از وقوع تنش کمبود آب در گندم، به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که در تیمار آبیاری کامل ارقام هما و ریژاو دارای کمترین مقدار مالون دی‌آلدئید ریشه بودند. در تیمار تنش خشکی کلیه ژنوتیپ‌ها، به‌غیر از Dari-16، دارای مالون دی‌آلدئید بیشتری بودند که نشان دهنده افزایش محتوای مالون دی‌آلدئید در شرایط تنش خشکی است (جدول ۳). افزایش محتوای مالون دی‌آلدئید در شرایط تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Li *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2017).

بر اساس نتایج تجزیه تابع تشخیص، تقسیم‌بندی ارقام گندم در دو گروه معنی‌دار بود، بر این اساس در تیمار آبیاری کامل ژنوتیپ‌های گندم برای ویژگی‌های مورد ارزیابی به دو گروه تقسیم شدند. ارقام سرداری، هشترود، آذر۲، تکاب، رصد، ریژاو و لاین Dari-12، لاین Dari-16، ارقام مهر، باران، اوحدی، ایوان، کمال، پراو، لاین Dari-13 و رقم واران درگروه اول و رقم هور، لاین Dari-19، ارقام صدرا، شالان، لاین‌های Dari-14، Dari-11، ارقام رحمت، هما، و سائین در گروه دوم قرار گرفتند (شکل ۱). ژنوتیپ‌های گروه اول دارای بیشترین درصد انحراف از میانگین کل برای کلیه صفات، به‌غیر از قطر ریشه بودند و کمترین درصد انحراف از میانگین کل را ژنوتیپ‌های گروه دوم داشتند. در این گروه ژنوتیپ‌ها تنها برای قطر ریشه دارای انحراف از میانگین مثبت بودند. این نتایج نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌های گروه اول مقادیر ویژگی‌های ریشه و عملکرد بیشتری نسبت به ژنوتیپ‌های گروه دوم داشتند (جدول ۶).

بر اساس نتایج تجزیه تابع تشخیص، تقسیم‌بندی ژنوتیپ‌های گندم به دوگروه انجام شد. ارقام سرداری، آذر۲، تکاب، ایوان، رصد، هما، لاین Dari-12، رقم اوحدی، لاین Dari-11، ارقام پراو، صدرا، لاین‌های Dari-16، Dari-16، Dari-19 درگروه اول و ارقام واران، کمال، باران، شالان، رحمت، لاین Dari-14، ارقام هور، ریژاو، مهر، سائین و هشترود در گروه دوم قرار گرفتند (شکل ۲). ارزیابی گروه‌های حاصل بر اساس درصد انحراف میانگین هر گروه از میانگین کل (جدول ۷) نشان داد که ژنوتیپ‌های گروه اول در کلیه صفات دارای بیشترین میانگین و گروه دوم کمترین میانگین را دارا بودند.



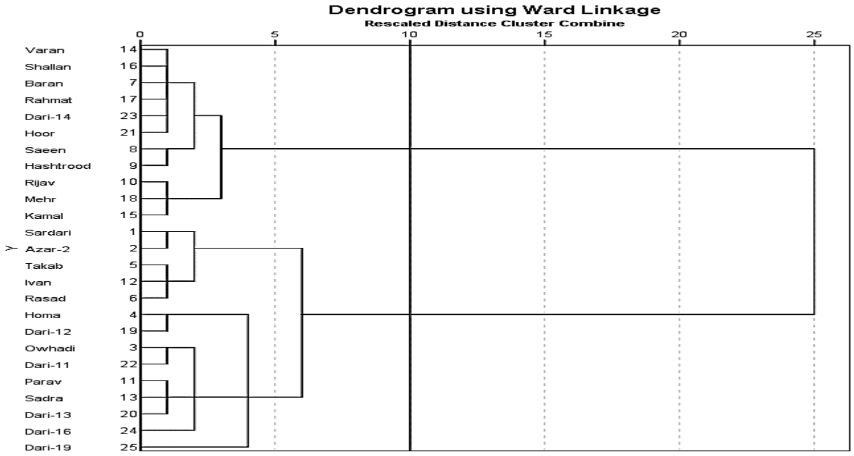
شکل ۱- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای برای صفات گیاهی ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمار آبیاری کامل (بدون تنش)

Fig. 1. Dendrogram of cluster analysis for plant traits of wheat cultivars and promising lines in full irrigation (normal) treatment

جدول ۶- میانگین و درصد انحراف از میانگین صفات گیاهی در گروه‌های ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمار آبیاری کامل (بدون تنش)

Table 6. Mean and deviation for plant traits of wheat cultivars and promising lines groups in in full irrigation (normal) treatment

		گروه ۱ Group 1		گروه ۲ Group 2	
Plant traits	صفات گیاهی	میانگین Mean	انحراف از میانگین Mean deviation (%)	میانگین Mean	انحراف از میانگین Mean deviation (%)
Root area	مساحت ریشه	136.3	3.50	124.8	-5.24
Root density	چگالی ریشه	0.45	3.24	0.42	-4.86
Root diameter	قطر ریشه	0.21	-0.18	0.21	0.26
Root dry weight	وزن خشک ریشه	2.83	0.76	2.78	-1.14
Root fresh weight	وزن تر ریشه	9.24	6.03	7.93	-9.04
Root length	طول ریشه	82.2	6.02	70.5	-9.03
Root volum e	حجم ریشه	15.4	7.67	12.6	-11.50
Grain yield	عملکرد دانه	3.83	3.22	3.53	-4.82



شکل ۲- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای برای صفات گیاهی ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمار تنش خشکی

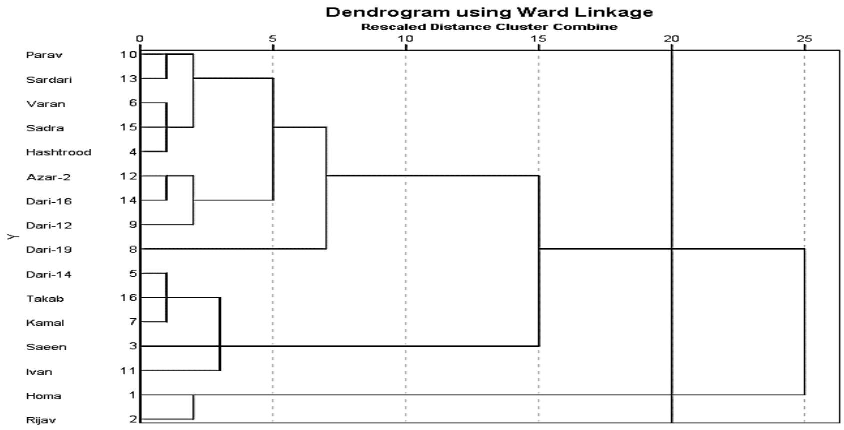
Fig. 2. Dendrogram of cluster analysis for plant traits of wheat cultivars and promising lines in drought stress treatment

جدول ۷- میانگین و درصد انحراف از میانگین صفات گیاهی در گروه‌های ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمار تنش خشکی

Table 7. Mean and deviation for plant traits of wheat cultivars and promising lines groups in drought stress treatment

		گروه ۱ Group 1		گروه ۲ Group 2	
Plant traits	صفات گیاهی	میانگین Mean	انحراف از میانگین Mean deviation (%)	میانگین Mean	انحراف از میانگین Mean deviation (%)
Root area	مساحت ریشه	129.5	10.07	109.8	-6.72
Root density	چگالی ریشه	0.32	16.48	0.24	-10.99
Root diameter	قطر ریشه	0.14	0.77	0.14	-0.51
Root dry weight	وزن خشک ریشه	2.63	6.17	2.38	-4.12
Root fresh weight	وزن تر ریشه	8.48	16.44	6.49	-10.96
Root length	طول ریشه	75.5	16.64	57.5	-11.09
Root volume	حجم ریشه	12.6	13.39	10.1	-8.93
Grain yield	عملکرد دانه	3.05	19.26	2.23	-12.84

بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای برای صفات بیوشیمیایی ریشه در تیمار آبیاری کامل و نتایج تجزیه تابع تشخیص، ژنوتیپ‌های گندم به دو گروه تقسیم شدند. گروه اول شامل رقم هشترود، لاین Dari-19، رقم واران، لاین Dari-12 و ارقام کمال، آذر۲، ایوان، لاین‌های Dari-16، Dari-14، ارقام تکاب، صدرا، سائین، سرداری و پراو و گروه دوم شامل ارقام هما و ریژاو بودند (شکل ۳). بر اساس نتایج درصد انحراف از میانگین هر صفت در گروه اول، درصد انحراف از میانگین برای محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید و عملکرد دانه مثبت بود و در گروه دوم درصد انحراف از میانگین برای محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید و عملکرد دانه منفی بود (جدول ۸).



شکل ۳- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای برای محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید ریشه ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمار آبیاری کامل (بدون تنش)

Fig. 3. Dendrogram of cluster analysis for Proline and Malondialdehyde content of root of wheat cultivars and promising lines in full irrigation (normal) treatment

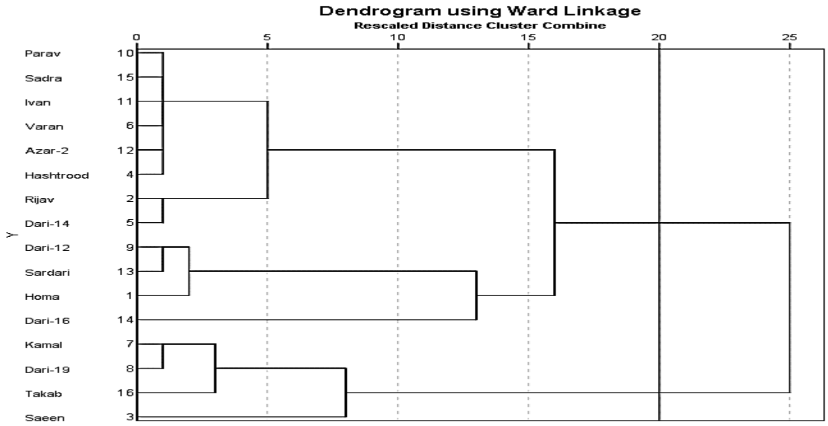
جدول ۸- میانگین و درصد انحراف از میانگین محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید ریشه در گروه‌های ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم
در تیمار آبیاری کامل (بدون تنش)

Table 8. Mean and deviation for Proline and Malondialdehyde content of root of wheat cultivars and promising lines in full irrigation (normal) treatment

		گروه ۱ Group 1		گروه ۲ Group 2	
Plant traits	صفات گیاهی	میانگین Mean	انحراف از میانگین Mean deviation (%)	میانگین Mean	انحراف از میانگین Mean deviation(٪)
Malondialdehyde	مالون دی‌آلدئید	0.17	2.0	0.14	-14
Proline	پرولین	0.27	1.9	0.23	-13.6
Grain yield	عملکرد دانه	3.70	0.3	3.60	-2.4

بر اساس تجزیه خوشه‌ای برای ویژگی‌های بیوشیمیایی ریشه ژنوتیپ‌های گندم در تیمار تنش خشکی و نتایج تجزیه تابع تشخیص، ژنوتیپ‌های گندم به دو گروه تقسیم شدند. ارقام کمال، تکاب، لاین Dari-19و رقم سائین در گروه اول قرار گرفته و ژنوتیپ‌های گروه دوم شامل ارقام آذر۲، ایوان، لاین‌های Dari-16، Dari-14، ارقام صدرا، هشترود، ریژاو، پراو، واران، لاین Dari-12، ارقام هما و سرداری بودند (شکل ۴). بر اساس نتایج درصد انحراف از میانگین هر صفت، گروه اول بیشترین درصد انحراف از میانگین برای هرسه صفت و گروه دوم کمترین درصد انحراف از میانگین را برای سه صفت دارا بودند. بر این اساس ژنوتیپ‌های گروه اول شامل ارقام کمال، تکاب، لاین Dari-19 و رقم سائین از نظر محتوای پرولین بیشتر و ژنوتیپ‌های گروه دوم شامل ارقام آذر۲، ایوان، لاین‌های Dari-16، Dari-14، ارقام صدرا، هشترود، ریژاو، پراو، واران، لاین Dari-12، ارقام

هما و سرداری از نظر محتوای مالون دی‌آلدئید کمتر در شرایط تنش ژنوتیپ‌های برتر بودند (جدول ۹).



شکل ۴- دندروگرام حاصل از تجزیه خوشه‌ای برای محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید ریشه ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمار تنش خشکی

Fig. 4. Dendrogram of cluster analysis for Proline and Malondialdehyde content of root of wheat cultivars and promising lines in drought stress treatment

جدول ۹- میانگین و درصد انحراف از میانگین محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید ریشه در گروه‌های ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم در تیمار تنش خشکی

Table 9. Mean and deviation for Proline and Malondialdehyde content of root of wheat cultivars and promising lines in drought stress treatment

		گروه ۱ Group 1		گروه ۲ Group 2	
Plant traits	صفات گیاهی	میانگین Mean	انحراف از میانگین Mean deviation (%)	میانگین Mean	انحراف از میانگین Mean deviation(٪)
Malondialdehyde	مالون دی‌آلدئید	0.20	7.1	0.18	-2.4
Proline	پرولین	0.31	8.3	0.28	-2.8
Grain yield	عملکرد دانه	2.53	6.9	2.31	-2.3

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم نان مورد ارزیابی در شرایط تنش خشکی، کاهش شدت خسارت از طریق کاهش یا افزایش ویژگی‌های ریشه صورت گرفته و باعث جلوگیری از کاهش عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های متحمل می‌شود. در ژنوتیپ‌های متحمل که در شرایط تنش خشکی دارای عملکرد دانه بهتری بودند، عملکرد دانه با مساحت ریشه، قطر ریشه، وزن تر ریشه، طول ریشه، حجم ریشه، محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت. ژنوتیپ‌هایی که دارای طول ریشه، حجم ریشه، وزن ترریشه، قطر ریشه، مساحت ریشه ، محتوای پرولین بیشتر و مالون دی آلدئید کمتر بودند، نسبت به تنش خشکی تحمل بیشتری از نظر عملکرد دانه داشتند. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای ویژگی‌های ریشه و عملکرد دانه

ژنوتیپ‌های گندم در تیمار تنش خشکی، ارقام سرداری، آذر۲، تکاب، ایوان، رصد، هما، لاین Dari-12، رقم اوحدی، لاین Dari-11، ارقام پراو، صدرا، لاین های Dari-13، Dari-16 و Dari-19 مقادیر بیشتری از نظر کلیه ویژگی‌های ریشه و میانگین عملکرد دانه داشتند. برای محتوای پرولین از بین ۱۶ ژنوتیپ منتخب گندم، ارقام کمال، تکاب، لاین Dari-19 و رقم سائین نیز بیشترین میانگین و از نظر محتوای مالون دی‌آلدئید ارقام آذر۲، ایوان، لاین‌های Dari-16، Dari-14، ارقام صدرا، هشترود، ریژاو، پراو، واران، لاین Dari-12، ارقام هما و سرداری کمترین میانگین را دارا بودند. بر اساس نتایج آزمایش حاضر، ارقام سرداری، آذر۲، تکاب، ایوان، رصد، هما، لاین Dari-2، رقم اوحدی، لاین Dari-11، ارقام پراو، صدرا، لاین‌های Dari-13، Dari-16و Dari-19 را با توجه به ویژگی‌های ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی ریشه و عملکرد دانه بالاتر، می‌توان به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی در نظر گرفت. توسعه ژنوتیپ‌های با ویژگی‌های مطلوب ریشه‌ای برای مناطقی که دارای محدودیت آبی هستند را می‌توان به‌عنوان یکی از راهکارهای جلوگیری از کاهش عملکرد دانه در گندم پیشنهاد کرد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور برای مساعدت در تهیه بذر ارقام گندم، سپاسگزاری می‌شود. از جناب آقای دکتر نوروزی و خانم‌ها مهندس سلیمانی و مهندس شفیعی که به اجرای این تحقیق کمک کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

References

Abdulshahi, R., A. Talei, A., Omidi, M. and Yazdi Samadi, B. 2019. Study of physiological and morphological traits related to drought tolerance in bread wheat. *Iranian Journal of Field Crop Sciences*, 2, pp.247-258 [In Persian]. doi: dorl.net/dor/20.1001.1.20084811.1389.41.2.5.6

Adda, A., Sahnoune, M., Kaid-Harch, M. and Merah, O. 2005. Impact of water deficit intensity on durum wheat seminal roots. *Comptes Rendus Biologies*, 328, pp.918-927. https://doi.org/10.1016/j.crvi.2005.08.002

Alizadeh, A. 2012. Water, Soil, and plant relationship. Imam Reza University Press. [In Persian].

Awasthi, J.P., Saha, B., B. Chowardhara, Devi, S.S., Borgohain, P. and Panda, S.K. 2018. Qualitative analysis of lipid peroxidation in plants under multiple stress through Schiff's reagent: a histochemical approach. *Bio-Protocol*, 8(8), pp.2807-2807. https://doi.org/10.21769/BioProtoc.2807

Bates, L.S., Waldern, R.P. and Teave, I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, pp.205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Bohm, W. 2012. Methods of Studying Root Systems. Springer, Germany. 33: 1-188. https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8

Colombi, T. and Walter, A. 2017. Genetic diversity under soil compaction in wheat: root number as a promising trait for early plant vigor. *Frontiers in Plant Science*, 420(8), pp.1-14. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00420

Emam, Y., Ranjbari, A.M. and Bahrani, M.J. 2007. Evaluation of yield and yield components in wheat genotypes under post-anthesis drought stress. *Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of*

Agriculture and Natural Resources), 11(1), pp.317-327. [In Persian]. dor: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.24.6

Faghani, E., Gharechahi, J., Komatsu, S., Mirzaei, M., Khavarinejad, R.A., Najafi, F., Farsad, L.K. and Hosseini Salekdeh, Gh. 2015. Comparative physiology and proteomic analysis of two wheat genotypes contrasting in drought tolerance. *Journal of Proteomics,* 114, pp.1-15. https://doi.org/10.1016/j.jprot.2014.10.018

Faisal, S., Mujtaba, S.M., Khan, M.A. and Mahboob. W.A.J.I.D. 2017. Morpho-physiological assessment of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought stress tolerance at the seedling stage. *Pakistan Journal of Botany,* 49(2) : 445-452. http://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/49(2)/08.pdf

Ganjeali, A., Kafi, M. and Sabet Teimouri, M. 2010. Variations of root and shoot physiological indices in chickpea (*Cicer arietinum* l.) in response to drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences,* 3(1), 35-45. [In Persian]. doi: 10.22077/escs.2010.81

Gheysari, M., Majidi, M.M., Mirlatifi, S.M., Zareian, M.J., Amiri, S. and Banifatemeh, S.M. 2015. The effects of two different deficit irrigation managements on the root length of maize. *Journal of Water and Soil,* 28(5), pp.890-898. [In Persian]. doi: 10.22067/JSW.V0I0.27891

Gill, S.S. and Tuteja, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry,* 48(12), pp.909-930. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016

Hasan, U.W., Roy, C., Chattopadhyay, T., Ranjan, D. and De, N. 2021. Effects of heat and drought stress on yield and physiological traits in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop and Weed,* 17(1), pp.203-210. https://doi.org/10.22271/09746315.2021.v17.i1.1425

Heath, R.L. and Packer, l. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics,* 125(1), PP.189-198. https://doi.org/ 10.1016/0003-9861(68)90654-1

Hosseinalipour, B., Rahnama, A. and Farrokhian Firouzi, A. 2020. Effect of drought stress on wheat root growth and architecture at the vegetative growth stage. *Iranian Journal of Field Crop Sciences,* 51(1), pp.63-75. [In Persian]. doi: 10.22059/ijfcs.2019.266586.654531

Johari-Pireivatlou, M. 2010. Effect of soil water stress on yield and proline content of four wheat lines. *African Journal of Biotechnology,* 9(1), pp.36-40. https://doi.org/10.5897/AJB09.521

Lambers, H., Chapin, F.S. and Pons, T.L. 2008. Plant physiological ecology. *Springer Science & Business Media,* 2(1), pp.11-99. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3

Li, H., Wang, Z., Ke, Q., Ji, C.Y., Jeong, J.C., Lee, H.S., Lim, Y.P., Xu, B., Deng, X.P. and Kwak, S.S. 2014. Overexpression of the code A gene confers enhanced tolerance to abiotic stresses in alfalfa. *Plant Physiology and Biochemistry,* 85, pp.31-40. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.10.010

Li, X., Ingvordsen, C.H., Weiss, M., Rebetzke, G.J., Condon, A.G., James, R.A. and Richards, R.A. 2019. Deeper roots are associated with cooler canopies, a higher normalized difference vegetation index, and greater yield in three wheat populations grown on stored soil water. *Journal of Experimental Botany,* 70(18), pp.4963-4974. https://doi.org/10.1093/jxb/erz232

Mahdavi, Z., Rashidi, V., Yarnia, M., Aharizad, S. and Rostaei, M. 2022. Grouping of advanced spring wheat genotypes based on morphological, physiological and yield components under drought stress. *Journal of Crop Breeding,* 14(42), pp.9-21. [In Persian]. doi: 10.52547/jcb.14.42.9

Manschadi, A.M., Hammer, G.L., Christopher, J.T. and Devoil, P. 2008. Genotypic variation in seedling root architectural traits and implications for drought adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil,* 303, pp.115-129. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9492-1

Nazari, H., Aharizad, S., Moghaddam Vahed, M. and Toorchi, M. 2017. Identify traits affecting grain yield in bread wheat recombinant inbred lines under drought stress. *Journal of Crop Ecophysiology (Agriculture Science),* [In Persian]. 2(42), pp.303-314.

Nezhadahmadi, A., Z.H. Prodhan, Z.H. and Faruq, G. 2013. Drought tolerance in wheat. *The Scientific World Journal,* Hindawi Publishing Corporation. pp.1-12. https://doi.org/10.1155/2013/610721

Prasad, P.V.V., Pisipati, S.R., Momčilović, I. and Ristic, Z. 2011. Independent and combined effects of high temperature and drought stress during grain filling on plant yield and chloroplast EF-Tu expression in spring wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science,* 197(6), pp.430-441. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00477.x

Rahnama, A., Hosseinalipour, B., Farrokhian Firouzi, A., Tom Harrison, M. and Ghorbanpour, M. 2024. Root architecture traits and genotypic responses of wheat at seedling stage to water-deficit stress. *Cereal Research Communications,* pp.1-12. https://doi.org/10.1007/s42976-023-00481-4

Rahnama, A., Munns, R., Poustini, K. and Watt, M. 2011. A screening method to identify genetic variation in root growth response to a salinity gradient. *Journal of Experimental Botany,* 62(1), pp.69-77. https://doi.org/10.1093/jxb/erq359

Rhodes, D. and Hanson, A.D. 1993. Quaternary ammonium and tertiary sulfonium compounds in higher plants. *Annual Review of Plant Biology*, 44(1), pp.357-384. https://doi.org/10.1146/annurev.pp.44.060193.002041

Vendruscolo, E.C.G., Schuster, I., Pileggi, M., Scapim, C.A., Molinari, H.B.C., Marur, C.J. and Vieira, L.G.E. 2007. Stress-induced synthesis of proline confers tolerance to water deficit in transgenic wheat. *Journal of Plant Physiology,* 164(10), pp.1367-1376. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2007.05.001

Wang, L., Wang, S., Chen, W., Li, H. and Deng, X. 2017. Physiological mechanisms contributing to increased water-use efficiency in winter wheat under organic fertilization. *Plos One,* 12(6), e0180205. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180205

Wasson, A.P., Richards, R.A., Chatrath, R., Misra, S.C., Prasad, S.S., Rebetzke, G.J., Kirkegaard, J.A., Christopher, J. and Watt, M. 2012. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany*. 63(9), pp.3485-3498. https://doi.org/10.1093/jxb/ers111

Xue, Q., Zhu, Z., Musick, J.T., Stewart, B.A. and Dusek, D.A. 2003. Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation. *Plant and Soil*, 257, pp.151-161. https://doi.org/10.1023/A:1026230527597

Zadoks, J.C., Chang, T.T. and Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), pp.415-421. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x